

自然風の特性と小形風車の応答性に関する実験的研究

その他（別言語等） のタイトル	An Experimental Study on Power Characteristics of a Small Wind Turbine Responding to Wind Fluctuations
著者	奥田 教海, 山岸 英明
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	37
ページ	373-380
発行年	1987-11-10
URL	http://hdl.handle.net/10258/745

自然風の特性と小形風車の応答性に関する実験的研究

奥 田 教 海・山 岸 英 明

An Experimental Study on Power Characteristics of a Small Wind Turbine Responding to Wind Fluctuations

K. OKUDA and H. YAMAGISHI

Abstract

Some of the problems relating between wind power estimates and the power characteristics of a small wind turbine are examined at MIT wind power site, Muroran.

The results obtained are as follows:

- (1) The Weibull probability density function can be used as a good model for wind speed distributions.
- (2) This model facilitates the computation of the mean wind power density with errors of several %.
- (3) Operating coefficients and power coefficients of the wind turbine are also calculated during test periods. Operating coefficients are high in prevailing wind periods, while power coefficients are high in less turbulent wind periods.
- (4) Higher mean wind power densities will be estimated when
 - (a) mean wind speed will be higher,
 - (b) shape parameter of Weibull model m will be lower in certain range of m .

1. ま え が き

筆者らは数年来、小形風車が、自然風の風況変動（主として風速変動と風向変動を指す）に応じてどのような応答性を示すか、すなわち風況変動の特性と風車出力の応答性について実験的に研究を進めてきた。

一般に風速の頻度分布は、ワイブル（Weibull）分布¹⁾に従って変化するといわれているが²⁾、今回は特に、その実験的検証を行ない、そのような風速頻度分布を示す風に対する風車の応答性——各月の風車稼働率、風車出力係数——を求めた。それらの結果を報告する。

ここで報告する風速、風速の平均値、風速頻度、風車出力係数、風力エネルギーなどの絶対値は、計測した年度の値であって、それらの値から一般性を引き出すことはできないが、それらの計測方法、データのまとめ方は、この種風車の性能を議論するときには、将来有益な参考資料となるであろう。それを期待して報告する。

2 実験装置と実験方法

本実験に用いた風車は図1に示すような、スイス Elektro 社製の WVO5G-24V 形（2枚プロペラ形，Clark-Y 翼形，風車羽根車直径2.5m，発電機定格500W）である。これを室蘭工業大学機械系研究棟屋上4.5mの高さ（地上高約16.5m）に設置し，その4m横にエアロベーン形風速計がある。

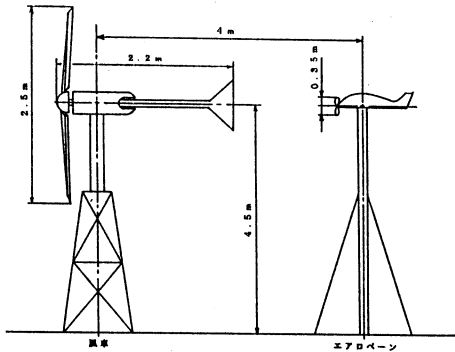


図-1 風車・風速計の位置と寸法

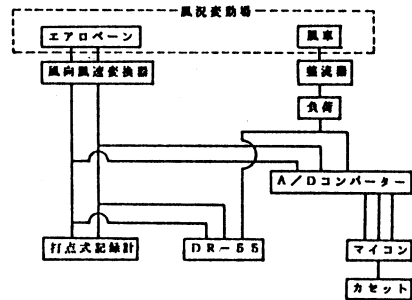


図-2 実験装置系統図

実験計測は図2に示す装置を用い，1986年7月から11月までの5ヵ月間を，便宜上，月ごとに区切ってデータを収録，整理した。

風車出力は，発電機が三相交流機であるので，整流器によって全波整流されてから負荷として接続されているニクロム線抵抗によって発熱放散される。その出力の値は，ニクロム線の抵抗値と，その両端の電位差より計算する。風速計の風向と風速の値は変換器を介して電圧値となり，その値を A/D 変換した後，サンプリング周期1分で，磁気テープ記録装置（商品名 DR-55）により連続30日分，カセットテープに記録される。このサンプリング周期1分という値は，前回の報告³⁾にある通り，長期間の観測に適する値である。

3. 実験結果と考察

3.1 時系列による風速と風車出力

図3は横軸に時間を取り，縦軸に風速と風車出力をとった，二つの実測例で，(a)は9月，(b)は11月の値である。(a)はあまり風速は高くないが平均的に風が吹いており，それなりの風車出力が得られている。(b)は強い風が吹いているが風況変動は大きく，強風時には高い風車出力が得られているが，それ以外ではあまり出力は得られていない例である。

3.2 風速頻度のワイブル分布について

ここで用いた風速頻度のワイブル分布関数は、次のような二つの定数をもつ分布関数である。

$$f(u) = \frac{m}{a} u^{m-1} \exp\left(-\frac{u^m}{a}\right) \quad (1)$$

ここで、 $f(u)$ ：風速 u の現われる確率密度関数 (probability density function)

m ：形状係数

a ：尺度係数。

m , a の値は最尤法によって求められる。次の尤度方程式において、初期値 m を仮定し、パーソナルコンピュータで収束計算を行ない、値を決定した。

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{N} \left\{ \frac{1}{a} \sum_{i=0}^k n_i \cdot u_i^m \cdot \log u_i - \sum_{i=0}^k n_i \cdot \log u_i \right\} \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^k n_i \cdot u_i^m$$

ここで、 k ：風速階級数

n_i ：風速階級 i での出現度数

N ：データ総数。

形状係数 m の値の変化による、一般的なワイブル分布関数の形状の変化を図4に示す。

$m < 1$ のとき $u = 0$ で最頻数をとる u の減少関数、

$m = 1$ では 指数関数となる。また

$m > 1$ のとき m の値が大きくなるほど分布形状の山の頭は高くなり、風速の高い方の頻度は少なくなっ

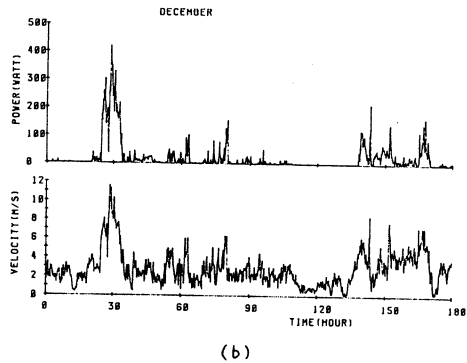
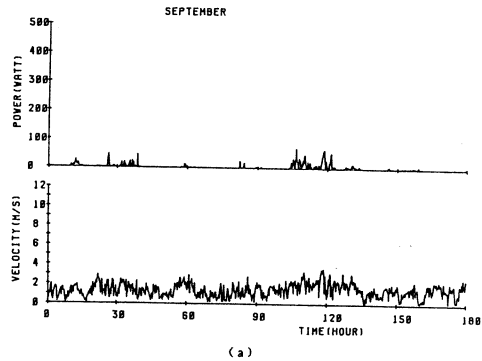


図-3 時系列による風速と風車出力

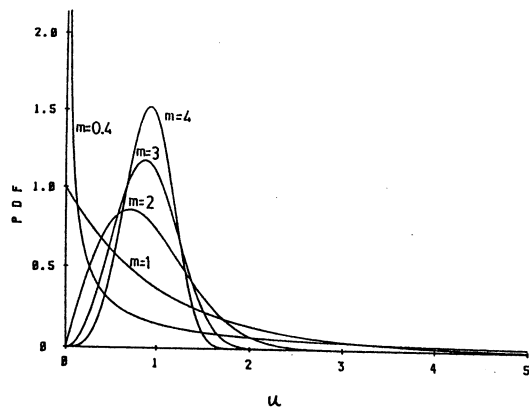
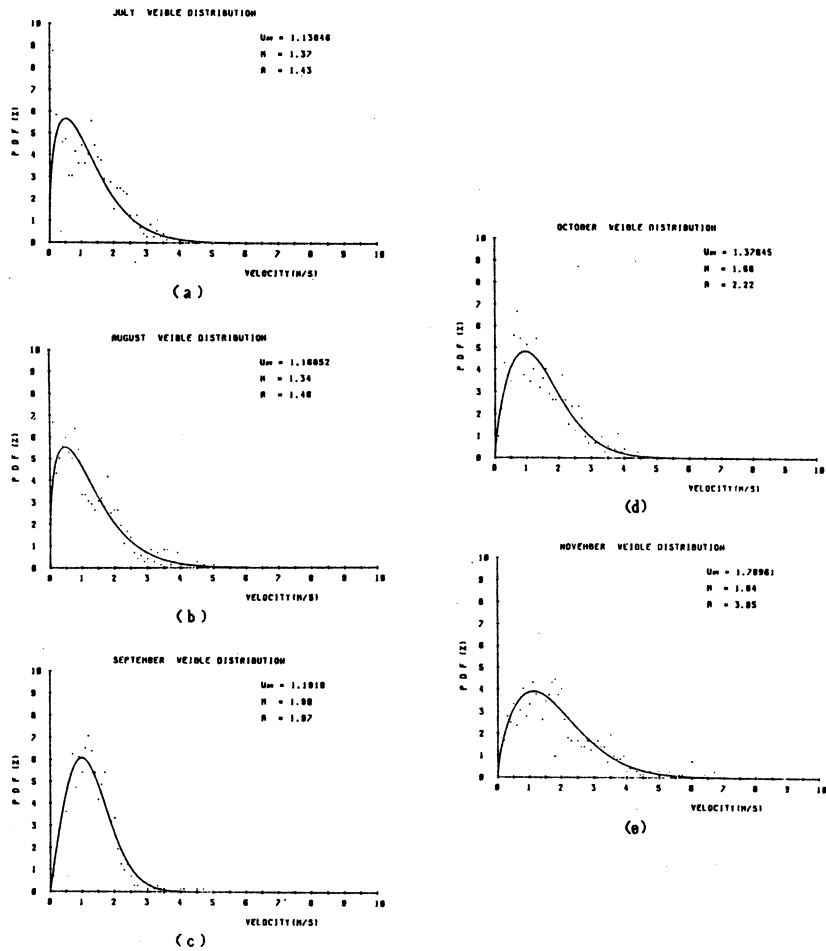


図-4 形状係数 m の変化によるワイブル分布関数



図一 5 観測期間中の風速頻度分布

表一 平均風速の実測値と計算値および誤差

month	$\bar{\mu}$ (m/s)	$\hat{\mu}$ (m/s)	error
July	1.14	1.19	4.4%
August	1.17	1.22	4.3%
September	1.19	1.25	5.0%
October	1.38	1.44	4.3%
November	1.71	1.77	3.5%

表二 風速の3乗の平均の実測値と計算値および誤差

month	$E(u^3)$ (m ³ /s ³)	$\hat{E}(u^3)$ (m ³ /s ³)	error
July	4.222	5.252	24.4%
August	5.473	5.777	5.6%
September	3.507	3.721	6.1%
October	6.372	6.906	8.4%
November	12.588	13.224	5.1%

て、低風速時の風速分布となる。

図5に、7月、8月……、11月の風速頻度分布の実測値、1時間平均値の30日分のデータと、それらにより計算した最も適合するワイブル分布曲線を、それぞれ(a), (b), ……、(e)として示した。これらより見れば、ワイブル分布関数は、それぞれ実際の風速頻度分布をよく表現していると見てよいであろう。また実際の風速頻度の変化は、7月から11月へと移るに従がい、大体において分布形状の頭の低い、強風形風速分布に移っている。

式(1)から、平均風速 $\hat{\mu}$ 、風速の3乗の平均 $\hat{E}(u^3)$ はガンマ関数を用いて、次式より推定することができる。

$$\hat{\mu} = a^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (3)$$

$$\hat{E}(u^3) = a^{\frac{3}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{3}{m}\right) \quad (4)$$

これらの式を用いて計算した値と、実測値の平均値を比較したものは表1、表2である。表1は実測値の平均値 $\hat{\mu}$ (m/s)、計算による平均値 $\hat{\mu}$ (m/s)とそれらの誤差(%)を示す。表2は風速の3乗に関するものである。表1より平均風速は誤差数%の範囲で推定できることがわかる。表2から風速の3乗の平均は、平均風速の場合よりも若干誤差は大きく出ている。7月の低風速の場合を除き、この場合も数%の誤差で風速の3乗の平均値を推定することができる。

この風速の3乗は後述の風力エネルギーを考える場合に必要な量である。

式(3)、(4)より風速の3乗の平均は平均風速と、形状係数のみの関数として表わされることがわかる。すなわち

$$\hat{E}(u^3) = \hat{\mu}^3 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right\}^{-3} \Gamma\left(1 + \frac{3}{m}\right) \quad (5)$$

図6には $m=1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ とおいたとき、上式より計算される $\hat{\mu}^3$ の乗数を用いて描いた平均風速 $\hat{\mu}$ と風速の3乗の平均 $\hat{E}(u^3)$ の曲線に、5カ月の間の各月の平均値をそれぞれプロットしてある。図5とこの図6を参照することによって、ほぼ次のような結論が誘導される。すなわち

高い風力エネルギーを得るためには、

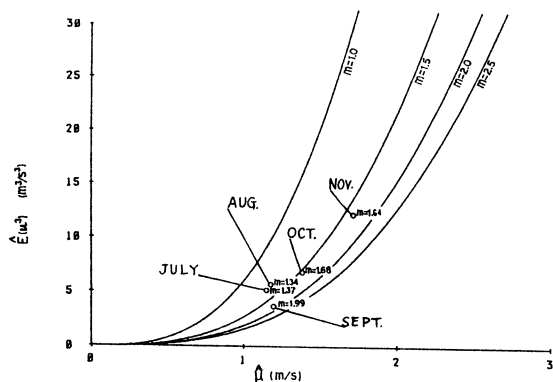


図-6 m をパラメータとする風速と風速の3乗

平均風速が高いこと（これは尺度係数が大きいことに対応する）に加えて、形状係数 m が、 $1.5 < m < 2.0$ の範囲の低い値をとるとき、すなわち強風形の風速頻度分布であることが必要である。

次に期間 T における平均風力エネルギー密度 \bar{P} は、次式で推定することができる。

$$\bar{P} = \frac{\rho}{2} \frac{\sum E(u^3)}{T} \quad (\text{Wh/m}^2) \quad (6)$$

ただし、空気の密度 $\rho = 1.23 \text{ kg/m}^3$

3.3 風速と風車の稼働率、出力係数、風力エネルギーについて

供試風車のカット・イン風速は $2.5\text{--}3.0 \text{ m/s}$ 、カット・アウト風速は 10 m/s に設計されている。（前者は風車の始動風速、後者は強風時、風車保護のため風車回転数を抑えるときの風速。）

過去の実測の経験から、集計する風速の最低値を何 m/s とするかによって風車の稼働率、出力係数が異ってくるという結果となり、確定値を得ることは困難である。

表-3 計数始風速と稼働率

m/S	0	2.5	3.0	3.5	4.0
JULY	22.4	11.0	6.6	2.9	1.5
AUGUST	24.2	11.8	7.6	4.2	2.5
SEPTEMBER	24.2	7.6	4.6	2.0	1.1
OCTOBER	22.6	14.4	10.7	6.1	3.7
NOVEMBER	25.6	20.7	16.7	10.8	7.2

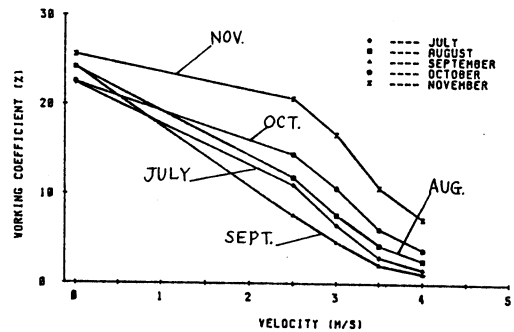


図-7 計数始風速と稼働率

表-4 計数始風速と出力係数

m/S	0	2.5	3.0	3.5	4.0
JULY	3.8	5.1	6.1	7.5	7.7
AUGUST	9.8	10.5	10.7	10.2	9.6
SEPTEMBER	12.6	12.2	12.3	9.7	9.1
OCTOBER	5.8	6.9	7.3	7.8	7.7
NOVEMBER	3.3	3.7	4.1	4.7	5.0

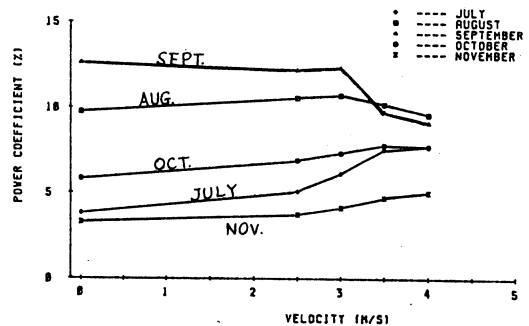


図-8 計数始風速と出力係数

それで、この報告では風速データの集計を始める最低の風速を「計数始風速」とし、それにより稼働率、出力係数を次のように定義することとする。

$$(\text{稼働率}) = \frac{(\text{計数始風速以上の風での風車の全稼働時間})}{(\text{測定期間})} \times 100 \quad (\%)$$

$$(\text{出力係数}) = \frac{(\text{計数始風速以上の風での全風車出力エネルギー})}{(\text{計数始風速以上の風のもつ全エネルギー})} \times 100 \quad (\%)$$

これらの定義に従って求めた稼働率を表3、図7、出力係数を表4、図8に示した。

これらの図表より11月の稼働率が他の月と比較して総ての計数始風速において高い値を示している。これは強い風の吹いている時間が長いことを意味する。また測定期間中の総ての風速について求められた稼働率（計数始風速0の稼働率）は各月とも20%を少し越える程度であった。風況変動に関する実測値はここに示してないが、出力係数は風況変動の割合少ない8、9月に10—12%程度、風況変動の激しい7、10、11月には4—8%程度に止まった。すなわち風車の稼働率がよくても、必ずしも出力係数がよいとは限らず、出力係数は風況変動の影響を受け、変動少ないとき出力係数は高い

表一5 風車の月別取得風力エネルギー

値となることがわかる。

次に全体的な風力エネルギー量について、月別に推定計算を行ってみる。前述の式(6)より、観測地点における1986年の平均風力エネルギー密度 (Wh/m^2) を求め、それに稼働率、出力係数、風車円板面積 ($=4.91m^2$) を掛けて、取得風力エネルギー

月	風力エネルギー密度 (Wh/m^2)	稼働率	出力係数	取得風力エネルギー (Wh)	エネルギー比 (7月を1.0)
7	2,326	0.110	0.051	64.1	1.00
8	2,558	0.118	0.105	155.6	2.43
9	1,648	0.076	0.122	75.0	1.17
10	2,699	0.144	0.069	104.2	1.63
11	5,856	0.207	0.037	220.2	3.44

(Wh) を計算したものを表5に示す。また7月の風力エネルギーを1.0としたときの月別のエネルギー比も併せて示してある。やはり7月から11月に近づく程、風力エネルギーは多く得られることになる。ただし、稼働率、出力係数は、計数始風速2.5m/s の場合の値とした。

4. ま と め

- (1) 自然風の風速頻度分布はワイブル分布にほぼ従うことが解った。
- (2) ワイブル分布関数を用いることにより平均風力エネルギー密度 (Wh/m^2) を数%の誤差で推定することができる。
- (3) 風車の稼働率がよくても、必ずしも出力係数がよいとは限らず、出力係数は風況変動の影響を受け、その変動少ないとき出力係数は高い値となる。

- (4) 高い風力エネルギーを得るためには、平均風速の高いこと、ワイブル分布の形状係数 m が、今回の観測では

$$1.5 < m < 2.0$$

の範囲の低い値であることが必要である。

文 献

- 1) J. P. Hennessey, Jr., Journal of Applied Meteorology, 16, (2)119 (1977)
- 2) 長井・篠田・牛山, 第8回風力エネルギー利用シンポジウム前刷集, 日本風力エネルギー協会, p. 39 (1986)
- 3) 奥田・山岸, 室蘭工業大学研究報告(理工編), (35), 55 (1985)